

# 원전 표준화 및 한국형 차세대 원자로 개발

김 종 신

한국전력공사 원자력기술실 실장

노 명 섭

한국전력공사 원자력기술실 차세대원자로부 부장

## 한

국에서의 원자력 사업은 한국전력공사가 70년에 고리 원자력 1호기를 웨스팅하우스 가압 경수로형 원전으로 건설할 것을 결정하면서 시작되었다.

그 후 한국에서의 원자력 발전의 중요성은 지속적으로 증대하여 왔으며, 현재는 전체 전력 설비의 30%, 발전량의 40%를 원자력이 점유하고 있다.

원자력 발전은 다른 발전원에 비해 기술 집약적이고 연료 공급원에 덜 의존적이기 때문에, 한국은 원자력 발전을 도입한 직후부터 건설 방식을 turn-key 방식에서 non turn-key 방식으로 전환하고 주계약자를 외국 회사에서 국내 회사로 전환하는 등 원전의 설계·제작 및 시공 능력을 증진시키기 위하여 많은 노력을 기울여 왔다.

이 기간 동안에 원전의 용량은

600MWe급에서 900MWe급으로 격상되었으며, 현재는 1,000MWe급이 표준형으로 자리잡고 있다.

한국에서는 가압 경수로가 주력 원자로형으로 선정되어 있으며, 86년부터 영광 3·4호기의 설계를 통하여 표준화되고 있다.

표준화와 더불어 건설·운영·정비 분야에서의 지속적인 개선과 원전 건설 및 운영 비용의 절감이 이루어지고 있다.

한국 표준형 원전(KSNPP Korean Standard Nuclear Power Plant)의 건설과 함께 한국형 차세대 원전(KNGR Korean Next Generation Reactor)으로 불리는 개량형 원자로의 설계가 진행되고 있다.

KNGR은 KSNPP의 개발 과정에서 축적된 기술적 경험에 기초를 두고 있다.

그러나 KNGR은 선행 원전들에

비해 많은 우수한 설계 특성을 갖고 있다.

KNGR의 설계는 2001년을 목표로 추진중에 있으며, 상업 운전은 2007년에 시작될 것으로 전망되고 있다.

## 원자력 기술 자립과 표준화

### 1. 기술 자립

에너지 자립이라는 국가적 목표를 달성하기 위하여, 정부의 정책적 지원하에 원전 표준화 및 중장기 원자력 연구 개발과 같은 다각적인 노력을 통하여 원자력 기술 자립 계획이 강력하게 추진되었다.

84년에 원전 건설 기술 자립을 위한 기본 계획이 수립되었다.

이 계획에 따라 영광 3·4호기의 건설 과정을 통하여 원전 기술 자립이 달성되었다.

한국전력공사는 영광 3·4호기 건설시 국내 회사를 주계약자로, 외국 기업을 하도급 계약자로 선정하였다.

한국의 원자력 기술 자립의 궁극적 목표는 고품질의 원전을 적절한 예산과 공기 내에 스스로의 힘으로 건설할 수 있는 능력의 확보에 있다.

기술 자립을 통하여 원전의 안전성과 운전 품질의 향상이 가능해지고 국가 에너지 자급률도 증가될 수 있다.

가. 1단계(70~78)

건설 방식 변경(turn-key → non turn-key)

나. 2단계(78~86)

주계약자 변경(외국 업체 → 국내 업체)

다. 3단계(86~90년대)

설계 방식 변경(합작 → 독자)

2. 원전 표준화

한국전력공사는 80년대에 원전 표준화의 중요성을 인식하고 원전 기술 자립을 추진하는 한편, 표준 원전의 개발에 착수하였다.

현재는 1,000MWe급 가압 경수로형 원전이 한국 표준형 원전(KSNPP)으로 자리잡고 있다.

KSNPP는 한국 산업계의 기술적 능력과 한국의 원전 운영 방식을 수용할 수 있도록 설계되었다.

한국적 특수성을 고려한 설계 요건을 만족시키기 위하여 ABB-CE사에 의해서 개발된 'System 80' 설계 개

념이 수정·보완되어 KSNPP의 설계에 반영되었다.

System 80 설계의 보완 사항에는 한국전력공사와 미국 전력연구소(EPRI)의 협력에 의해서 개발된 사업자 규제 요건(URD Utility Requirements Document)의 개선 사항 등이 포함된다.

KSNPP의 주요 기술적 개선 사항은 다음과 같다.

- 가장 최근의 규제 요건이 반영되었다.
- 안전 여유도가 증가되었다.
- 사고 방지를 위해 계통 및 기기가 단순화되었다.
- 건설·운전 및 정비의 편의성이 크게 증대되었다.
- 충분히 입증된 최신 기술이 활용되었다.

3. KSNPP의 독특한 설계 특성

가. 원자로심

KSNPP는 붕소 농도의 변화를 최소화하면서 원자로심을 부분적으로 기동하는 것이 가능하다.

이것은 KSNPP가 연속적인 출력 분포를 감시하는 데 고정형 노내 핵계측 계통을 이용하기 때문에 가능한 것이다.

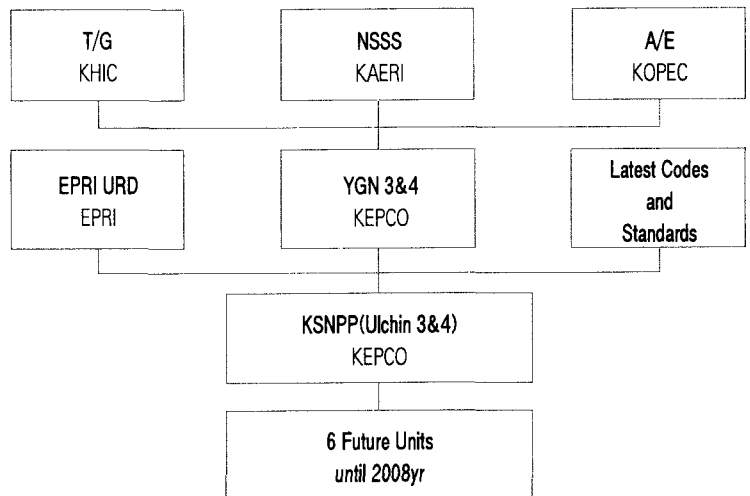
나. 원자로 용기

원자로 용기는 ring-forged 제작 방법을 통해서 제작되었다.

이 방법은 rolled and welded plate 제작 방법에 비해서 용접 개소를 줄이고 용기 제작 공정을 단순화할 수 있다.

다. 가압기

가압기의 체적이 1.57ft<sup>3</sup>/MW로 증대되었다.



〈그림 1〉 KSNPP의 개발 구조

가압기 체적의 증가는 과도 상태 및 사고시의 발전소 대응 능력을 크게 향상시킨다.

라. 정지 냉각 계통

정지 냉각 계통의 설계 압력이 900psig로 증가되었으며, 이로 인하여 원자로 냉각재 계통 압력의 상실 가능성이 낮아진다.

**한국형 차세대 원자로 개발**

KSNPP의 건설과 병행하여, 한국은 KNGR 프로젝트로 불리는 차세대 원자로 개발 계획을 92년부터 추진하고 있는데, 상세 설계는 2001년에 완성될 예정이다.

이 계획은 보다 안전하고 경제적이면서 환경 친화적인 에너지원을 2000년대 초기부터 공급한다는 목표하에 개량형 원자로를 개발하는 것을 목표로 하고 있다.

**1. KNGR 설계 과정**

이 계획은 각각의 개발 단계에 따라 3단계로 구성되어 있다.

상세 표준 설계의 완성 기간은 9년으로 계획되어 있으며, 2000년대 초반에 최초 호기를 건설할 것을 목표로 하고 있다.

가. 제1단계(92~94)

Korea Utility Requirements Document(KURD)의 최고 단계(top tier level)가 발간되었고, 설계 개념이 다음 단계의 기준으로 활용될

수 있도록 개발되었다.

KURD는 KNGR의 성능 및 안전 목표를 기술하고 있다.

KURD의 목표에 기초를 둔 설계 개념은 기본 설계 및 상세 설계를 수행하기 위한 기준으로 활용된다.

나. 제2단계(95~99)

발전소 설계는 설계 인증을 취득할 수 있는 단계까지 수행될 예정이다.

이는 전체 설계 공정의 20% 정도에 해당된다.

한국전력공사는 이 단계에서 표준 안전성 분석 보고서(SSAR) 및 검사·시험·분석 및 허가 기준(ITAAC) 등과 같은 인허가 자료를 개발할 계획이다.

다. 3단계(98~2001)

설계의 공학적 범위가 설계 인증 수준 이상으로 완성될 것으로 평가된다.

KNGR이 첫번째로 시도되는 공학적 시도(first-of-a-kind engineering)이기 때문에, 신뢰할 수 있는 비용 및 건설 공기 평가를 제공할 수 있을 정도까지 충분한 완성도를 갖도록 전체 발전소 설계를 수행하는 것이 요구된다.

**2. KNGR 프로젝트 조직**

KNGR을 개발하기 위하여, 한국 원자력계의 기업체 및 특수 연구 기관 등을 통합한 프로젝트팀이 구성되었다.

한국전력공사는 이 계획에서 주도

적인 역할을 수행하고 있으며, 한국 전력기술(주)가 1차 계통 설계와 발전소 설계를, 한국중공업(주)는 기자재 설계, 한국원자력연구소는 1차 계통 연구 개발, 한국원전연료(주)는 최초 노심 설계를 담당하고 있다.

기초 연구를 위해서는 대학 연합체로 구성된 신형원자로연구센터(CARR)가 참여하고 있고, 규제 기관으로서 한국원자력안전기술원이 참여하고 있다.

**3. KNGR의 설계 특성**

KNGR은 KSNPP의 개발 과정에서 축적된 기술적 경험에 기초하고 있다.

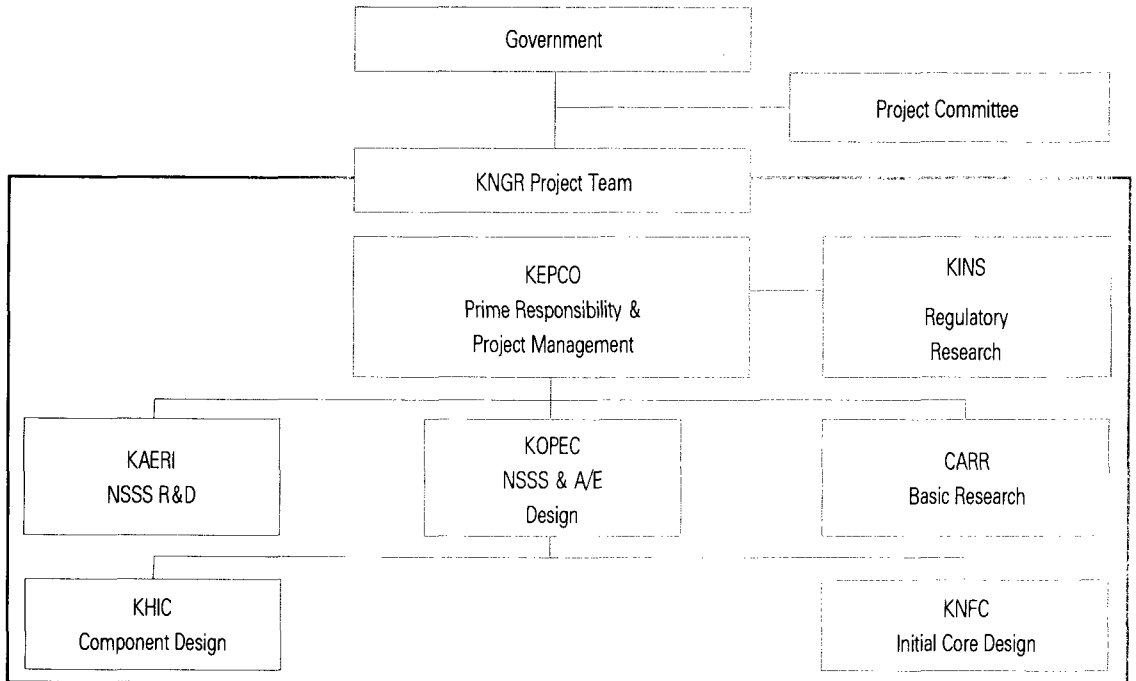
KNGR은 또한 안전성 증진과 경제적 목표에 대한 사업자의 요구 사항과 중대 사고 완화와 같은 새로운 인허가 현안을 만족하기 위해서 설계를 수정·보완하였다.

KNGR이 KSNPP의 개량형이기 때문에 1차 계통의 기본적인 구성은 KSNPP와 동일하다.

즉 2대의 증기 발생기와 2개의 고온관, 4개의 저온관, 4대의 원자로 냉각재 펌프가 설치되어 있다.

그러나 KNGR은 KSNPP에 비해 많은 설계 개선 사항을 포함하고 있다.

예를 들면 KNGR은 격납 건물 내부의 연료 저장장 용수 공급 계통, 4계열의 안전 주입 계통, 원자로 용기 직접 주입, 그리고 많은 피동형 설계



〈그림 2〉 KNGR의 프로젝트 조직

특성을 갖추고 있다.

또한 설계 용량은 KSNPP에 비해 30% 증가된 1,300MWe급이 될 것이다.

가시적인 계통 특성 외에도 많은 설계 개선 사항이 있다.

인적 요소를 고려하여 설계된 중앙 제어실, 비상 노심 냉각 계통의 설계 단순화 및 비상 급수 계통 등이 설계 개선의 한 예이다.

KNGR의 설계 개념에는 다른 개량형 경수로의 우수한 특성과 설계 기준 등이 반영되어 있다.

이들 개량형 경수로들은 KNGR

〈표〉 KNGR의 주요 요건

Items	KNGR	KSNPP
<b>General Requirements</b>		
Capacity	4,000MWt	2,815MWt
Plant Lifetime	60years	40years
Seismic Design	SSE 0.3g	SSE 0.2g
Containment Building	Concrete Double Containment	Single Containment
<b>Safety Goals</b>		
Core Damage Frequency	10E-5/Ry	10E-4/Ry
Large Radiation Release	10E-6/Ry	10E-5/Ry
<b>Performance Requirements</b>		
Plant Availability	90%	87%
Unplanned Trip	less than 0.8/y	0.9/y(94)
Occupation Radiation Exposure	100man-rem/Ry	120man-rem/Ry
Construction Period	48months	62months

의 안전성 및 경제성 목표를 설정하기 위하여 정량적으로 평가되었다.

KNGR의 설계 요건은 이러한 비교·연구를 통하여 수립되었다.

〈표〉에서 보는 바와 같이 KNGR은 안전성과 경제성을 함께 증진시킬 수 있다.

확률론적 안전성 평가 측면에서 본다면, KNGR은 노심 손상 확률과 사고시의 방사능 유출 확률이 현행 설계에 비해서 1/10 정도 낮게 될 것이다.

KNGR의 경제성 목표는 다른 에너지원에 대한 현저한 우위를 확보하는 것이다.

이러한 경제성 목표는 뛰어난 운영 실적과 건설 비용의 절감을 통하여 달성하게 될 것이다.

#### 4. KNGR 1단계의 결과

1단계에서는 설계 개념과 최고 단계의 요건을 정립하기 위하여 몇가지 연구가 수행되었다.

예를 들면 이용 가능한 설계 방안들을 심도있게 검토함으로써 한국 실정에 맞는 원자로형을 선택하기 위한 비교 연구가 수행되었다.

비교 연구와 병행하여 피동형 발전소의 용량을 증대시킬 수 있는 가능성을 조사하기 위한 사례별 연구가 수행되었다.

그리고 피동형 설계 특성을 개량형 원전에 접목시키기 위한 타당성 연구도 수행되었다.

#### 가. KURD의 개발

KURD 개발의 2가지 주요 목적은 설계 개념에 대한 명확한 목표의 제시와 전체 설계 단계 동안 요건들을 활용하기 위한 것이다.

한국전력공사의 지도하에서 각각의 참여 기관들을 설계 영역의 책임에 따라서 요건의 초안을 개발해 왔다.

#### 나. 외국의 개량형 경수로 평가

KNGR의 참조 원전 선정과 설계 원칙을 개발하기 위하여 4개의 원자로(AP-600, System 80+, APWR, N4)의 주요 특성에 대한 정성적 비교가 수행되었다.

이 연구는 기본 설계가 완료된 개량형 원자로에 대해서만 수행되었다.

#### 다. 대용량 개량형 경수로에의 피동형 안전 특성 통합 연구

이 목적은 안전 여유도를 증가시키고 안전 계통의 실현성을 개선시키기 위하여 피동형 안전 설계 특성을 대용량 개량형 원자로에 통합시킬 수 있는 가능성을 평가하기 위한 것이다.

또한 이 연구는 KNGR 개발 프로그램에 대한 안전성 증진 평가의 일환이기도 하다.

#### 라. 개념 설계

위에서 언급한 바와 같이 설계 개념을 정립하고 개념적인 설계 입력을 제공하기 위해서 여러 가지의 연구가 수행되었다.

KNGR의 설계 개념은 몇가지 피동형 안전 특성의 측면에서 4,000 MWt급 개량형 원자로의 설계 개념과 일치한다.

그러나 설계 개념은 2단계 프로그램에서 수행 예정인 최적화 연구의 결과에 따라 변경될 수 있다.

#### 5. KNGR 2단계 활동

제2단계는 95년부터 99년까지로, 이 기간 동안의 주요 활동은 KNGR의 인허가 시현성을 확보하기 위한 기본 설계의 개발이다.

설계 완성도는 측정하기가 매우 어렵지만 전체 사업 관리 목적상 측정이 요구되어진다.

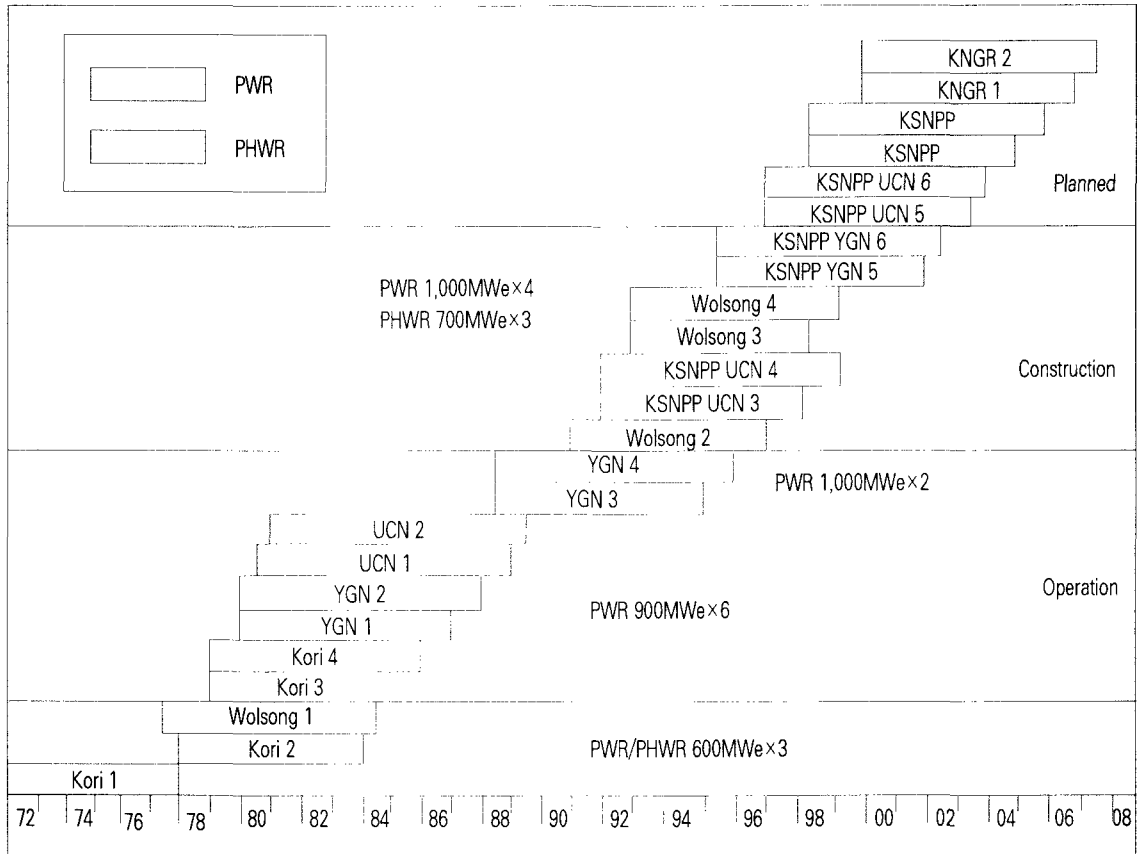
한국전력공사는 2단계 종료 시점에서 설계 완성도가 발전소 시운전에 필요한 전체 공학적 작업의 20% 정도에 해당될 것으로 판단하고 있다.

현재 진행중인 2단계 프로그램의 주요 활동은 기초 연구, 상세 URD 개발, 규제 연구, 정보 관리 시스템 개발 및 설계 활동 등으로 구분되어질 수 있다.

설계 업무가 진행됨에 따라서 규제 기관과의 인허가 협의 또한 중요성을 띠게 될 것이다.

이외에도 엔지니어링 능력을 향상시키고 설계 대안을 모색하기 위한 몇가지의 지원 연구 개발이 수행될 예정이다.

또한 격납 건물 내부 연료 재장전



(그림 3) 원자력 개발 계획

수 계통, fluidic device, 피동형 2차 응축 계통 등의 설계와 기능을 입증하기 위한 시험이 수행될 예정이다.

### KSNPP와 KNGR의 원자력 프로그램

영광 3·4호기 이후 울진 3·4호기를 포함하여 2008년까지 8기의 KSNPP가 건설될 예정이다.

KNGR은 KSNPP 프로그램과 원자력 기술 자립 프로그램 그리고 지난 20년간의 뛰어난 운영 실적으로부터 많은 이득을 얻고 있다.

특히 투자 채원의 보호와 중대 사고의 예방 측면에서, KNGR의 설계는 향후 국내 원전의 강화된 안전 요건과 경제성 목표를 만족시킬 수 있을 것이다.

KNGR의 설계가 완성되는 2001

년부터 건설이 시작될 예정으로 있다.

따라서 우리는 위에서 언급한 설계 개념을 채택한 최초의 KNGR이 2007년부터 운전에 들어갈 것으로 예상하고 있으며, 고속 증식로의 상용화 이전까지는 KNGR이 계속 건설될 것으로 기대하고 있다.